Particle-Scale Dynamics of Fluidized Beds
– analogy to equilibrium states –

市來健吾 (京大人環) [1]

粉体流動層の数値モデル [1] の系統的なシミュレーションを実施した。モデルは以下のとおりである。

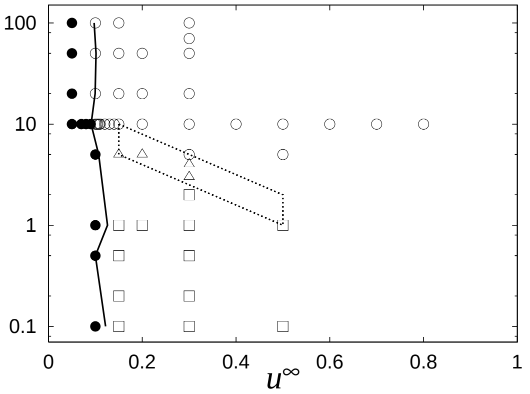
$$St\frac{d\mathbf{U}}{dt} = -\mathbf{U} + \mathbf{V} + \mathbf{F}_c \tag{1}$$

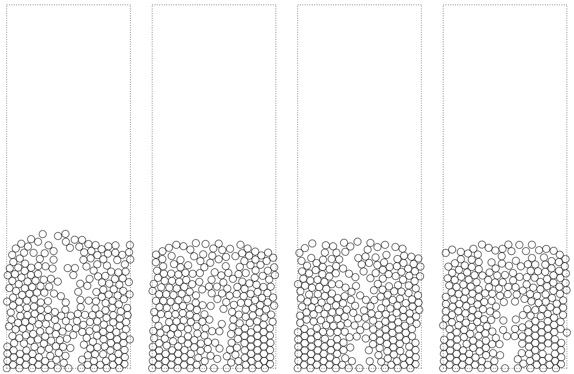
ここで $\mathbf{U}$ は粒子速度、$\mathbf{F}_c$ はハードコアによる接触力、St は 粒子速度 $\mathbf{U}$ の終端速度 $\mathbf{V}$ への緩和時間で、$\mathbf{V}$ は以下の式で与えられる。

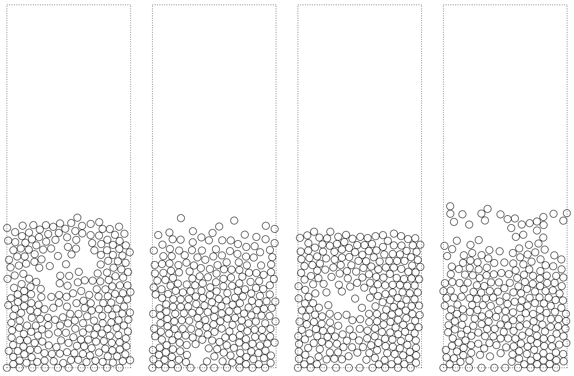
$$\mathbf{V} - \mathbf{u}^\infty = -\mathsf{R}^{-1}\cdot\mathbf{E}_z \tag{2}$$

ここで $\mathbf{u}^\infty$ は流体の流入速度、$-\mathbf{E}_z$ は重力向きの単位ベクトル、R は流体力学的相互作用を表すレジスタンス行列である。

用いたシステムは鉛直単層で、粒子の挙動は2次元的である。自由粒子数が $N_M = 256$、固定粒子数が $N_F = 10$、基本セルの大きさが $(L_x, L_y, L_z) = (34, 2, 100)$ である。パラメータ空間 (u^∞, St) 中のシミュレーション実施点は右図の通りである。ここで ●は「固定状態」、□ は「チャンネル状態」、○は「気泡状態」、△ はチャンネルと気泡の遷移状態である。また実線は流動化開始流速 u_cである。「チャンネル状態」と「気泡状態」の典型的な挙動を以下に示す。(左が「チャンネル」、右が「気泡」)



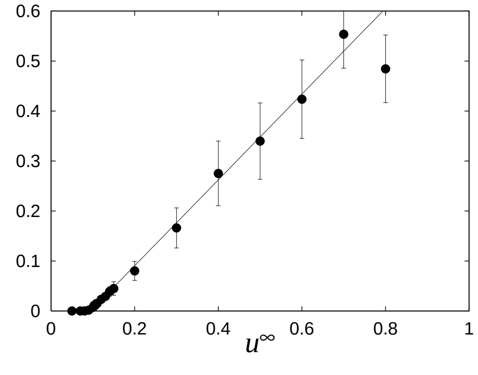




粒子の平均運動エネルギー$\bar{E}$の流入速度依存性を右図に示す。この結果は以下の式で良く表される。

$$\bar{E}(u^\infty) = \begin{cases} 0 & (u^\infty < u_c) \\ A_E(u^\infty - u_c) & (u^\infty > u_c) \end{cases} \tag{3}$$

A_E と u_c はフィッティングパラメータである。このことから、流動化転移は $u^\infty = u_c$で起こる連続転移で、エネルギーは流動状態で流入速度に線形に振舞う。これは、『流入速度 u^∞ が粒子が接している環境の『有効温度』に対応する」事と矛盾しない。



---

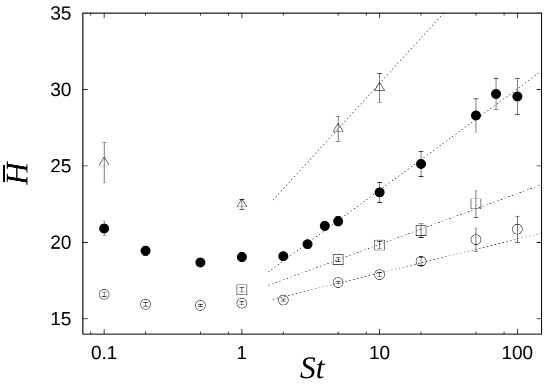
[1] Email: ichiki@phys.h.kyoto-u.ac.jp

粒子の重心の高さ $\bar{H}$ の St 依存性を右図に示す。ここで、∘は $u^{\infty} = 0.15$、□ は 0.2、• は 0.3、△ は 0.5 に対応する。図中のフィッティングは

$$\bar{H}(St) = C_H \ln(St) + D_H \tag{4}$$

で行った。St が系の特徴的時間である事に注意すると、次のような活性化過程が示唆される。

$$\tau \propto \exp\left(F \frac{\Delta V}{u^{\infty} - u_c}\right) \tag{5}$$



ここでτは系に隙間ΔV が生じる時間である。この場合有効粘性 μ_e は次のように書ける事は自然である。

$$\mu_e \propto \ e^{\varepsilon/(u^{\infty} - u_c)} \tag{6}$$

この式は、実験的に測定された流動層の有効粘性の u^{∞} 依存性に似た挙動である。ただし実験ではアレニウス型 $\exp(\varepsilon/u^{\infty})$ としている。[2]

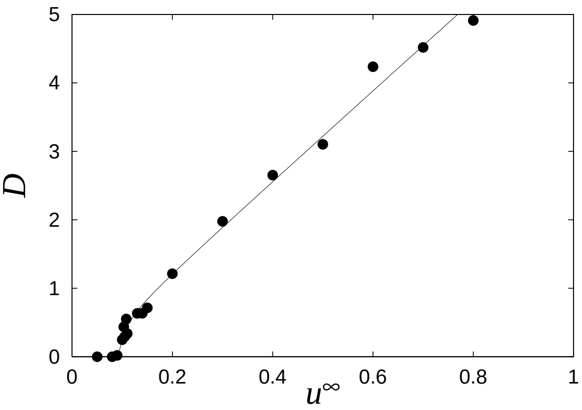
拡散係数 D の u^{∞} 依存性を右図に示す。この振舞いは以下の関数形で非常に良く表される。

$$D(u^{\infty}) \propto u^{\infty} e^{-\varepsilon/(u^{\infty} - u_c)} \tag{7}$$

ここで、これまで議論して来た二つの解釈、流入速度が有効温度と見做せる事 ($T^{*} \propto u^{\infty}$)、有効粘性が $\mu_e \propto \ e^{\varepsilon/(u^{\infty} - u_c)}$ と振舞う事、を考慮すると、(7) 式は次のように書き直す事が出来る。

$$D \propto \frac{T^{*}}{\mu_e} \tag{8}$$

これは拡散係数と易動度を結びつけるアインシュタインの式である。この関係は通常平衡状態での揺らぎと輸送係数を関係付ける揺動-散逸定理の一種である。



流動層が平衡状態から大きく離れた系である事を考えると、この結果は、非平衡定常状態と熱平衡状態の間に定量的な相似性が成り立つ事を示唆していると思われる。

本研究の詳細は文献 [3],[4] にゆずる。

参考文献

[1] K.Ichiki and H.Hayakawa, Phys. Rev. E **52**, 658 (1995).

[2] J.Furukawa and T.Ohmae, Ind. Eng. Chem. **50**, 821 (1958).

[3] 市來健吾、学位論文 (東北大学、平成 8 年度)

[4] K.Ichiki and H.Hayakawa Phys. Rev. E (published in Feb. 1998).